

応答スペクトルの距離減衰式に及ぼす 減衰定数の影響

丸山 喜久¹・山崎 文雄²

¹正会員 千葉大学助手 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yमारुやま@tu.chiba-u.ac.jp

²正会員 千葉大学教授 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

本研究では、気象庁87型地震計で観測された地震記録をもとに、減衰比1%、2%、5%、10%および20%の応答スペクトルの距離減衰式を構築し、5%減衰の応答スペクトルを基準とした各減衰の応答スペクトル比に、マグニチュード、震源距離、震源深さ、地盤条件が与える影響を検討した。さらに、距離減衰式から予測される応答スペクトル比と実地震記録を用いて算出した応答スペクトル比を比較し、その推定精度を検討した。以上の検討をふまえて、5%減衰の応答スペクトルを任意の減衰定数の応答スペクトルに換算する方法を示した。

Key Words : response spectrum, damping ratio, attenuation relationship, JMA magnitude

1. はじめに

地震応答スペクトルは、線形1自由度系の最大応答量を系の固有周期と減衰定数の関数として表したものである。応答スペクトルは1930年代にBilotiによって示され、Housnerによって詳しい検討がなされた¹⁾。応答スペクトルは、耐震工学上有益な情報を含んでいることから、その後広く用いられるようになった。設計示方書などで規定される地震荷重には、5%減衰の応答スペクトルが用いられることが多い。

構造種別ごとの設計用減衰定数の目安としては、鉄筋コンクリート造で2~4%、鉄骨造で1~3%²⁾とされている。また、タンクのスロッシングや、長大吊橋などの構造物は減衰定数が0に近いことが知られている³⁾。したがって、設計用地震荷重として用いられている5%減衰の応答スペクトルを任意の減衰定数の応答スペクトルへと換算する必要があるが、その際の補正は全周期帯に一律の補正係数を乗じることで行われている^{2,3)}。そもそも応答スペクトルの振幅形状は、マグニチュード、震源深さ、断層面への最短距離、地盤条件など地震および地点ごとに様々であると考えられ、全周期帯で一律の補正係数を乗じることには問題が残る。

丸山ら⁴⁾は常時微動のHVスペクトル比を用いて、5%減衰の応答スペクトルを推定する方法を提案している。

村岡ら⁵⁾は、近傍の余震記録を用いてParzenウィンドウで平滑化した2地点間のスペクトル比を作成し、本震の5%減衰の応答スペクトルを推定する方法についてその推定精度を検討している。5%減衰の応答スペクトルに対する任意の減衰定数の応答スペクトルの比が明らかとなれば、地震計が設置されていない地点や何らかの原因で地震記録の得られなかった地震観測点における任意の減衰の応答スペクトルの推定が可能となる。

地震発生直後のガスの供給停止基準にはSI値が用いられている^{6,7)}。SI値は20%減衰の速度応答スペクトルを周期0.1~2.5秒の区間で積分することで算出される。また、JR東日本では、地震時運転規制の基準値の地震動指標を最大加速度からSI値へ変更した⁸⁾。任意地点で推定された5%減衰の応答スペクトルを20%減衰の応答スペクトルへ換算できれば、現状の基準SI値の妥当性についてもより詳細な検討が可能となる。

そこで、本研究では気象庁87型地震計で得られた3990記録⁹⁾を用いて減衰比1%、2%、5%、10%および20%の応答スペクトルの距離減衰式を構築し、減衰定数が距離減衰式の回帰係数に与える影響を検討した。最近、震源依存、地点依存の入力地震動を時刻歴波形で推定されるようになってきた¹⁰⁾が、地震直後の被害把握を支援するリアルタイム地震防災システムを考えると、簡易に地震動強さを推定することが望まれる。また、地震発生地

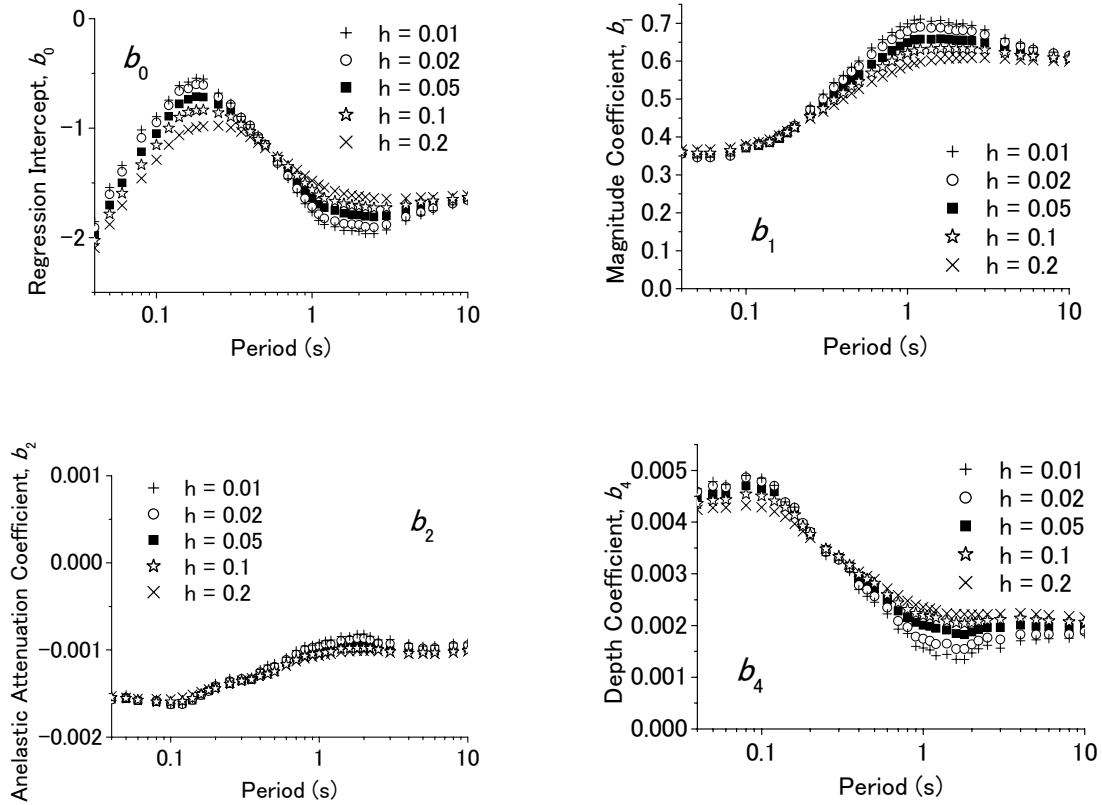


図-1 速度応答スペクトルの距離減衰式の回帰係数

点も前もって想定されているとは限らないので、過去の地震の統計解析から導かれた距離減衰式を用いることは、平均的な地震動強さを早期に推定するのに有効である。

さらに、構築された距離減衰式から5%減衰の応答スペクトルを基準とする各減衰の応答スペクトル比を算出し、マグニチュード、断層最短距離、地盤条件の影響を検討した。また、実地震記録を用いて距離減衰式から推定される応答スペクトル比の妥当性を評価した。

2. 距離減衰式から推定される応答スペクトル比と減衰定数の関係

(1) 応答スペクトルの距離減衰式

Shabestari and Yamazaki⁹⁾が計測震度の距離減衰式を構築する際に用いた、気象庁 (JMA) 87型地震計で1988年8月から1996年3月末の間に観測された1020地震による3990記録のデータセットから応答スペクトルの距離減衰式を構築した。加速度記録 (時間刻み0.02秒) には、ハイパスフィルターを施し、0.05Hz以下の振動数成分を取り除いた。2003年9月に気象庁がマグニチュードの算出方法を変更した¹¹⁾が、その際に改訂されたマグニチュードの値を本研究の解析では反映している。回帰に用いた関数形は以下のようである。

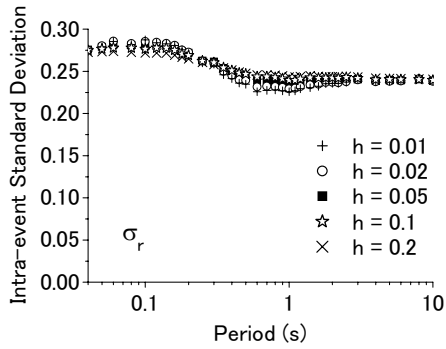
$$\log_{10} y(T) = b_0(T) + b_1(T)M + b_2(T)r + b_3(T)\log_{10} r + b_4(T)H + c_i(T) \quad (1)$$

ここで、 $y(T)$ は (絶対) 加速度応答スペクトル (S_a) または (相対) 速度応答スペクトル (S_v) の水平2成分最大値、 M はJMAマグニチュード、 r は断層最短距離、 H は震源深さである。 $b_i(T)$ は周期 T ごとの回帰係数であり、幾何減衰 b_3 は全周期において-1に固定している。 c_i は地点係数であり、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられることができる。なお、地点係数の平均値は0となっている。

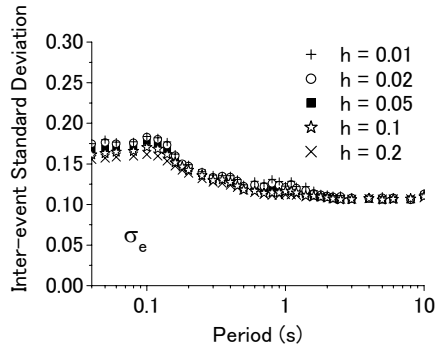
通常の距離減衰式の回帰の方法としては、Joyner and Boore¹²⁾による2段階回帰がよく用いられている。ここでは、地点ごとに異なる地点係数を決定する際にその分のダミー変数も必要となるため、Molas and Yamazaki¹³⁾による3段階回帰法によって係数を求めた。応答スペクトルの減衰は最もよく使われる5%のほか、1%、2%、10%および20%と定め、加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの距離減衰式を構築した。

(2) 減衰定数ごとの距離減衰式の回帰係数の比較

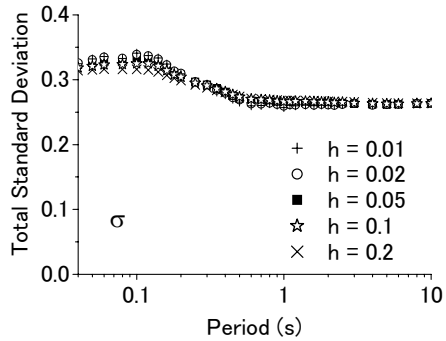
図-1に、速度応答スペクトルの距離減衰式における回帰係数を減衰定数ごとに比較する。これによると、距離に関する回帰係数である b_2 は、減衰定数の違いによる値



(a) 地震内標準偏差 (σ_r)



(b) 地震間標準偏差 (σ_e)

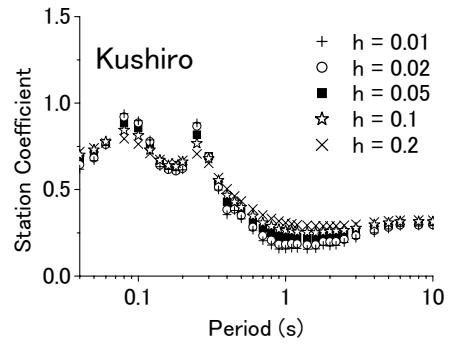


(c) 全標準偏差 (σ)

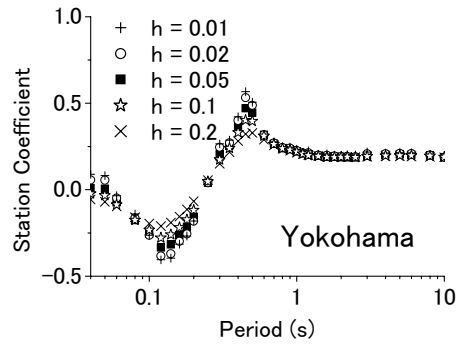
図-2 速度応答スペクトルの距離減衰式における標準偏差と減衰定数の関係

の差は小さい。深さに関する回帰係数である b_4 には、減衰定数の影響がやや見られるが、回帰係数の絶対値が小さいため無視できる差異であると考えられる。マグニチュードに関する係数である b_1 は減衰定数によって値が変化していることが確認できる。また、周期のみの関数である b_0 にも減衰定数による値の違いがあることが確認できる。

距離減衰式による予測値と観測値との比の常用対数の分布は、対数正規分布とみなせる¹⁴⁾ことが指摘されている。この比の分散は地震内の分散と地震間の分散に分離できる^{12),15)}。すなわち、距離減衰式による予測値と観測



(a) 釧路気象台



(b) 横浜気象台

図-3 速度応答スペクトルの地点係数と減衰定数の関係

値との比の常用対数の分散 (σ^2) は、以下のように書ける。

$$\sigma^2 = \sigma_r^2 + \sigma_e^2 \quad (2)$$

ここで、 σ_r は地震内の標準偏差、 σ_e は地震間の標準偏差である。図-2に、本研究で構築した速度応答スペクトルの地震内標準偏差、地震間標準偏差および全標準偏差を示す。減衰定数の違いは標準偏差の値にあまり影響しないことがわかる。従来から指摘されているように、速度応答スペクトルの短周期成分の標準偏差が大きい¹⁶⁾。また、地震内標準偏差が地震間標準偏差よりも大きく、全標準偏差に大きな影響を与えている^{17), 18)}。Molas and Yamazaki¹³⁾が構築した最大速度 (PGV) の距離減衰式的全標準偏差は0.235、翠川・大竹¹⁸⁾によるPGVの距離減衰式的全標準偏差は0.28である。本研究で構築された速度応答スペクトルの距離減衰式的全標準偏差 (図-2(c)) は、周期1秒以上の速度応答スペクトルがPGVに漸近する長周期域で0.26程度に収束する。

図-3に、釧路気象台と横浜気象台の速度応答スペクトルの地点係数を減衰定数に関して比較する。減衰定数の違いが影響した地点係数の値の差異はそれほど小さくなく、振幅形状がよく似ていることが確認できる。

本項で図示した結果は、速度応答スペクトルの距離減衰式の回帰係数であるが、加速度応答スペクトルの距離

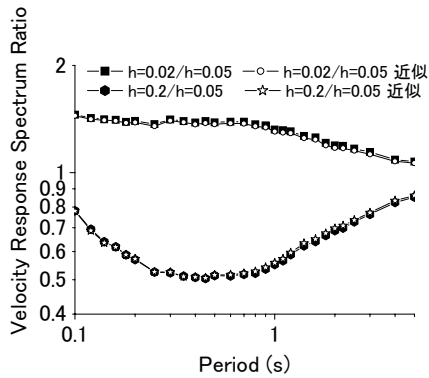


図-4 速度応答スペクトル比の近似精度

減衰式についても同様の傾向が確認できた。したがって、以下では速度応答スペクトルの距離減衰式を用いて検討を行うこととした。

(3) 応答スペクトル比に対するマグニチュードと距離の影響

構築した距離減衰式を用いて、5%減衰の応答スペクトルに対する1%、2%、10%および20%減衰の応答スペクトル比を計算した。ここで、77気象台の平均的な地盤上での応答スペクトル比を想定し、地点係数 c_i を0と定めた。5%減衰の応答スペクトルを基準とした応答スペクトル比は式(3)のように書ける。

$$\log_{10} \frac{y^h}{y^{0.05}} = (b_0^h - b_0^{0.05}) + (b_1^h - b_1^{0.05})M + (b_2^h - b_2^{0.05})r + (b_4^h - b_4^{0.05})H \quad (3)$$

ここで、 y^h は減衰 h のときの応答スペクトルで、 b_i^h はその距離減衰式の回帰係数を表す。

b_2 は、減衰定数によらずほぼ近い値を示しており、 b_4 は、回帰係数の絶対値が小さいため減衰定数の違いの影響をあまり受けない(図-1)ことから式(3)は以下のように近似できる。

$$\log_{10} \frac{y^h}{y^{0.05}} \approx (b_0^h - b_0^{0.05}) + (b_1^h - b_1^{0.05})M \quad (4)$$

図-4に、 $M=7$ 、 $r=100$ km、 $H=10$ kmとして式(3)、(4)から算出した速度応答スペクトル比を比較する。これによると、図-1の結果から予想された通り、式(4)は式(3)を精度よく近似できている。式(4)には r と H に関する回帰係数が含まれていないので、応答スペクトル比は断層最短距離や震源深さにはあまり影響されず、減衰定数、周期、マグニチュードに依存するものと考えられる。

次に、式(4)を用いて、マグニチュードと応答スペクトル比の振幅形状の関係について検討を行った。日本建築学会の建築物荷重指針・同解説²⁾では、5%減衰の応答

スペクトルから任意の減衰の応答スペクトルに換算する際に、式(5)の全周期で一様な補正係数を乗じるとよいとしている。

$$\mu_d = \frac{1.5}{1+10h} \quad (5)$$

また、道路橋示方書・同解説¹⁹⁾では、川島らの行った206成分の加速度波形を用いた加速度応答スペクトル比の統計的な解析^{3),20)}をもとに、式(6)のような補正係数が用いられている。

$$c_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \quad (6)$$

ここで、式(6)は加速度応答スペクトルに対する補正係数であるが、疑似速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルの近似関係をふまえて、速度応答スペクトルにも適用できるものとした。

図-5に、式(4)から推定される5%減衰の速度応答スペクトルに対する1%、2%、10%および20%減衰の速度応答スペクトル比を示す。図中では、マグニチュードを6~8の間で変化させている。また、式(5)、(6)から算出される5%減衰の応答スペクトルに対する補正係数も図中に併せて示す。これによると、応答スペクトル比の値は周期ごとに異なり、またマグニチュードの大小による影響も受けることがわかる。減衰定数が1%と20%の場合に、マグニチュードの違いによる応答スペクトル比の影響が大きくなる。また、式(5)、(6)から算出される補正係数は、2%、10%減衰の応答スペクトルに関してはある程度良好な補正が行えると考えられるが、とくに20%減衰の応答スペクトルに関して、式(5)の補正係数では周期約0.7秒以上の長周期域で、道路橋示方書の補正係数では周期1秒以下の周期域で換算の精度が低下することが考えられる。

(4) 距離減衰式から得られる応答スペクトル比の精度の検証

応答スペクトルの距離減衰式から推定される5%減衰の応答スペクトルに対する1%、2%、10%および20%減衰の応答スペクトル比と、実地震記録から算出される応答スペクトル比の平均値を比較し、距離減衰式から導かれる応答スペクトル比の推定精度の妥当性を検証する。各地震に関して、防災科学技術研究所の地震計ネットワークであるK-NETやKiK-net地震計で観測された地震記録を用いて、5%減衰の応答スペクトルに対する様々な減衰定数の応答スペクトル比を算出し、距離減衰式から推定される5%減衰の応答スペクトルに対する各減衰の応答スペクトル比と、実地震記録から算出される応答スペクトル比を比較した。

図-6に、2003年十勝沖地震 ($M=8.0$, 36記録), 2004

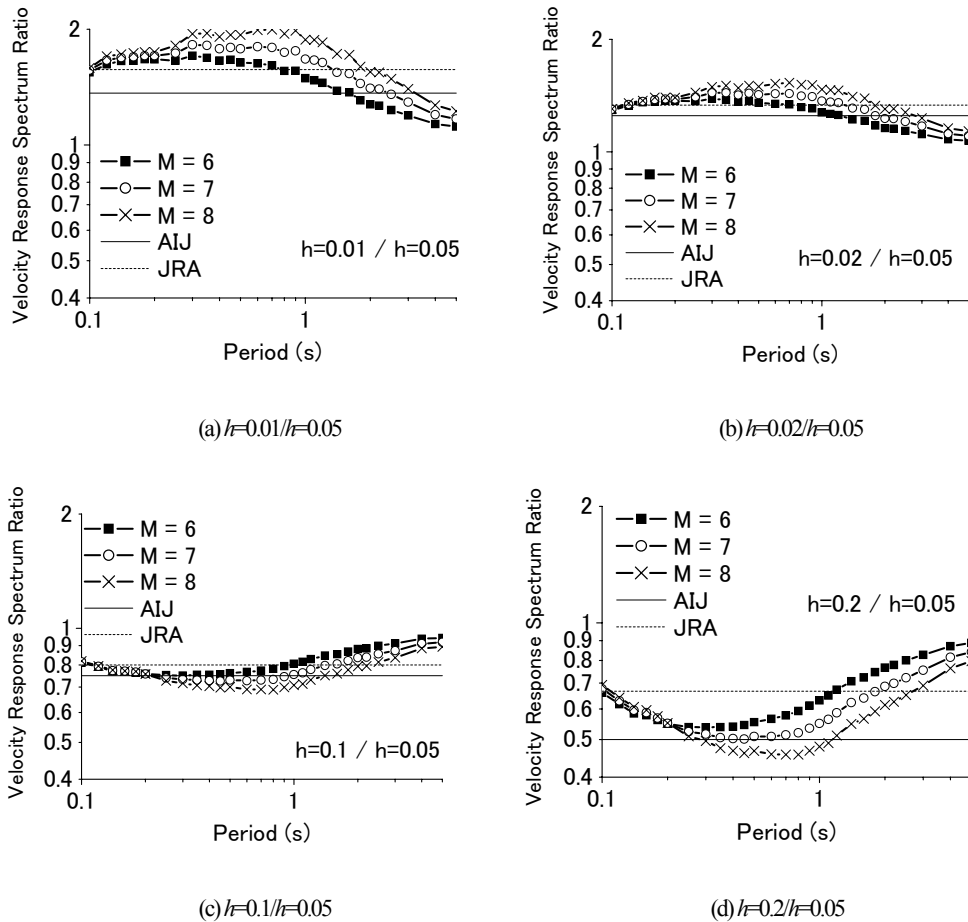


図5 距離減衰式から算出された5%減衰の速度応答スペクトルに対する様々な減衰定数の速度応答スペクトルの比

年新潟県中越地震 ($M = 6.8$, 48記録), 2005年3月20日に発生した福岡県西方沖地震 ($M = 7.0$, 22記録) および2005年4月11日の千葉県北東部地震 ($M = 6.1$, 17記録) における5%減衰の速度応答スペクトルに対する各減衰の速度応答スペクトルの比を複数の記録の平均として求め、式(4)にマグニチュードを代入して求めた応答スペクトル比と比較する。なお、本研究で構築した距離減衰式にはこれらの地震の記録は使用していない。兵庫県南部地震など距離減衰式を構築する際に用いている地震記録に関しては、応答スペクトル比が精度よく推定されることはある程度予測がつくのでここでの検証には用いなかった。

これによると、十勝沖地震と福岡県西方沖地震における5%減衰の速度応答スペクトルに対する1%、20%減衰の速度応答スペクトル比の推定精度があまりよくないが、それ以外は概ね精度よく推定できている。距離減衰式におけるバラツキの要因には、震源特性、伝播経路、地盤特性の3つの影響が重なり合っている¹⁸⁾ものと考えられる。このうち地震間のバラツキの要因として考えられる点としては、マグニチュードのみを用いたのでは震源から励起される地震動強さを十分に表現できない場合があることが挙げられる。この点には、応力降下量の違いな

どが影響していると考えられている²¹⁾。地震動強さがマグニチュードのみでは十分に説明できないため、地動加速度を用いて算出される応答スペクトルについても地震間でバラツキが生じるものと考えられる。福岡県西方沖地震のモーメントマグニチュード (M_w) は6.6²²⁾であり、気象庁マグニチュード (7.0) との差がやや大きい。2000年鳥取県西部地震 ($M_w 6.6$) では、強いLove波が観測されたことが原因となり、気象庁マグニチュード (7.3) と値が乖離したことが指摘されている²³⁾。震源深さが地下数kmと浅い地震では強い表面波が形成されることが多いので、福岡県西方沖地震でも気象庁マグニチュードはモーメントマグニチュードと比べてやや大きくなっているとも解釈される。このように、マグニチュードだけから地震動強さを説明するのが困難である場合もあるので、震源特性を起因とする距離減衰式の誤差に関しては今後検討を要すると思われる。

図5、図6に示したとおり、2%、10%減衰と5%減衰の応答スペクトルの比を見ると従来までの通り、全周期に同一の補正係数を乗じることである程度精度よく換算できるものと考えられるが、減衰定数が大きくなったり小さくなったりするにつれて、応答スペクトル比が周期に依存する傾向が見られる。都市ガスの地震時供給停止

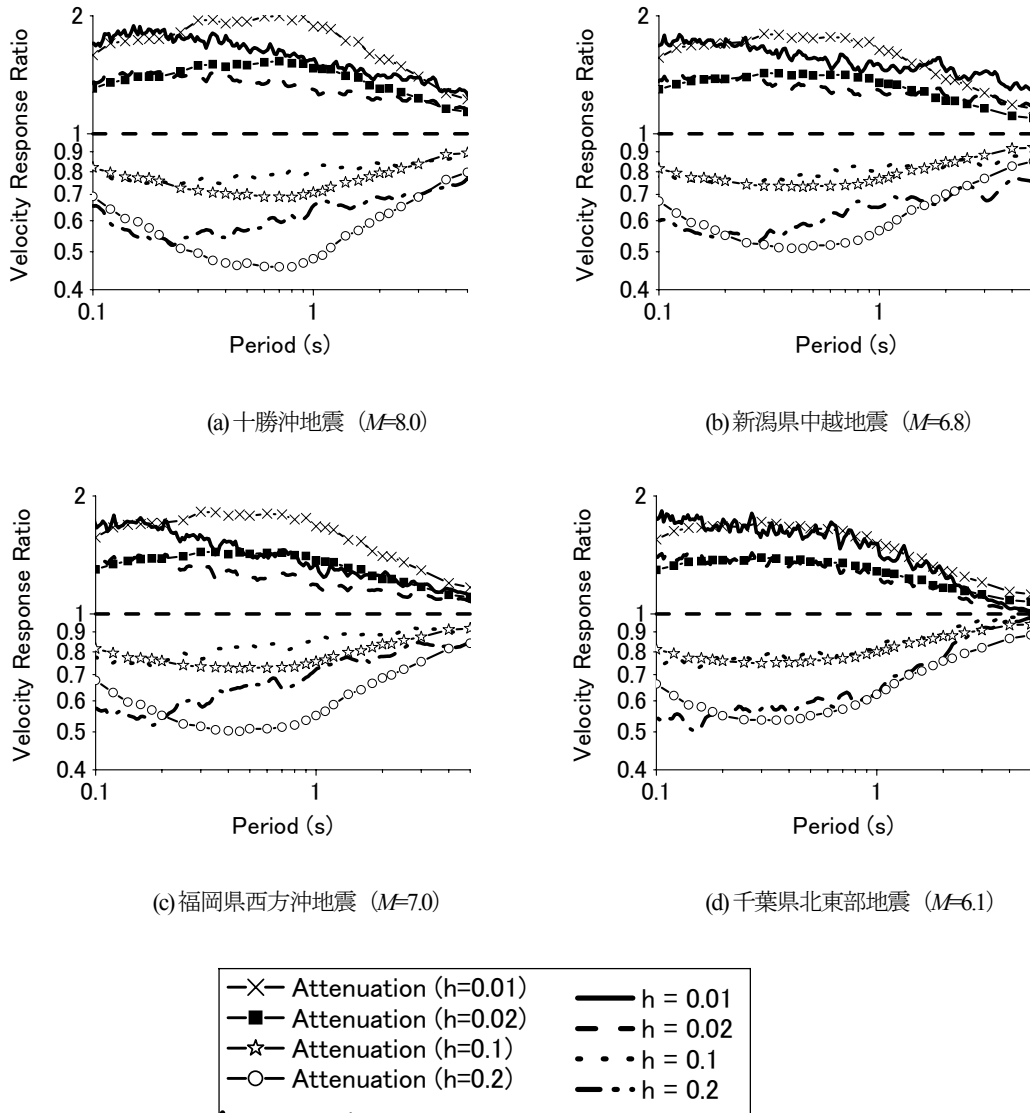


図-6 実地震記録に基づく5%減衰の速度応答スペクトルに対する様々な減衰定数の速度応答スペクトルの比と距離減衰式から算出される速度応答スペクトル比の比較

基準⁶⁾や鉄道の地震時運行規制⁸⁾に用いられるSI値は20%減衰の速度応答スペクトルをもとに算出されることや、長周期地震動による影響が懸念されるタンクのスロッシングの影響を検討するときには、低減衰の応答スペクトルが用いられることなどを考えると、5%減衰の応答スペクトルから任意の減衰定数の応答スペクトルに換算する際には、周期に依存した換算係数を用いることが望ましいと考えられる。

3. 減衰定数5%の応答スペクトルから推定される他の減衰定数の応答スペクトル

本研究で構築した応答スペクトルの距離減衰式を用いて、5%減衰の応答スペクトルを様々な減衰定数の応答

スペクトルに換算する。まず、地震記録を用いて5%減衰の応答スペクトルを計算する。得られた5%減衰の応答スペクトルに、式(4)で与えられる5%減衰の応答スペクトルに対する異なる減衰定数の応答スペクトルの比を乗じることで、任意の減衰定数の応答スペクトルに換算する。1地点の応答スペクトルには、距離減衰式の地点係数に対応するその地点の地盤条件が反映されている。5%減衰の応答スペクトルに式(4)を乗じることで、地点効果を反映した他の減衰比の応答スペクトルが得られる。

丸山ら⁴⁾は、基盤面が共通であると仮定できる2地点において、常時微動のH/Vスペクトル比の比がS波の1次卓越周期付近では2点間の水平成分の伝達関数比と近似できることを解析的に示し、近傍の地震観測点における5%減衰の応答スペクトルから任意の地点の5%減衰の応答スペクトルを推定する方法を提案している。また、村

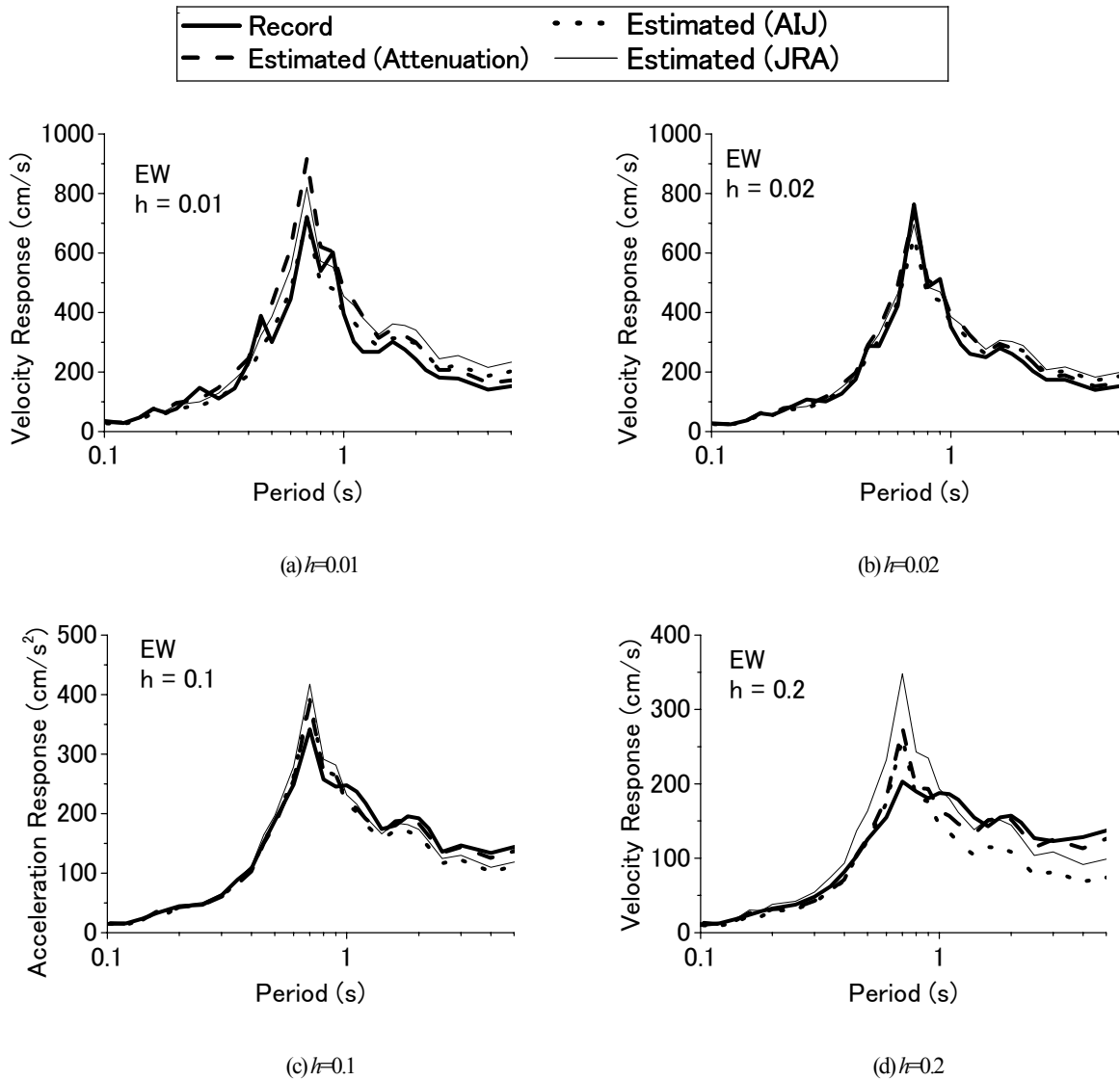


図-7 5%減衰の速度応答スペクトルから推定した様々な減衰定数の速度応答スペクトルと地震記録から計算した速度応答スペクトルの比較 (新潟県中越地震, K-NET小千谷記録)

岡ら⁹⁾は余震1記録から得られるParzenウィンドウで平滑化したフーリエスペクトル比を用いて、本震の5%減衰の応答スペクトルを推定する方法を提案している。常時微動から推定された5%減衰の応答スペクトルを本研究で示した方法で換算すれば、任意の地点の様々な減衰定数の応答スペクトルの推定が可能であり、余震から推定された5%減衰の応答スペクトルを任意の減衰定数の応答スペクトルに換算できれば、何らかの原因で本震の記録が得られなかった場合でも地震動強さをより定量的に評価することが期待される。

距離減衰式を用いた推定法の精度の検討には、新潟県中越地震におけるK-NET小千谷記録を用いた。図-7に、地震記録から計算された1%, 2%, 10%および20%減衰の速度応答スペクトルと、5%減衰の速度応答スペクトルと式(4)を用いて推定された速度応答スペクトルを比較する。図中には、建築物荷重設計に規定されている式

(5)による推定結果と、道路橋示方書が規定する式(6)による推定結果も併せて示している。なお、対数軸では応答スペクトルの値が大きい範囲の軸間隔が狭く推定精度を明確にするのが困難であるので、グラフの縦軸を実数軸として図示している。これによると、前述の通り2%, 10%減衰の応答スペクトルを算出する場合は、式(5), (6)のように全周期に一定の値の補正係数を乗じることで、精度よく5%減衰の応答スペクトルから換算することが可能である。1%減衰の速度応答スペクトル (図-8(a))は図-6(b)から予想されるように、距離減衰式を用いた場合に周期0.5-0.9秒の範囲でとくに式(5)の結果と比べてやや過大な推定値を示している。しかし、20%減衰の応答スペクトルに関しては、建築物荷重設計指針に規定されている式(5)による方法では周期0.7秒以上の長周期の範囲で推定精度が低下する。また、道路橋示方書で用いられている補正係数を用いると、周期1秒以下では過大で

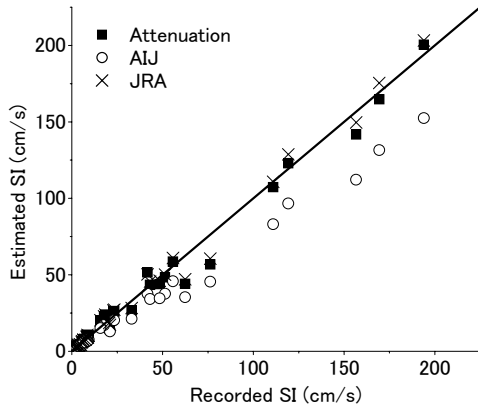


図-8 本研究で構築した速度応答スペクトルの距離減衰式を用いて推定したSI値と式(5), (6)を用いて推定したSI値の比較(新潟県中越地震)

周期1秒以上ではやや過小な推定速度応答スペクトルが得られる。距離減衰式を用いた場合に関しては、周期0.7秒付近の換算応答スペクトルがやや過大な値を示しているが、概ね地震記録から計算される応答スペクトルをよく再現している。

図-8に、新潟県中越地震を例に、速度応答スペクトルの距離減衰式を用いて5%減衰の速度応答スペクトルより換算された20%減衰の速度応答スペクトルから計算したSI値と、地震記録から計算したSI値を比較する。また、図中では、式(5), (6)の補正項を用いた推定速度応答スペクトルから算出されるSI値も併せて示している。ここで、SI値は式(7)のように計算した。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv^{h=0.2}(T)dT \quad (7)$$

これによると、本研究で構築した速度応答スペクトルの距離減衰式を用いた方が、建築物荷重指針・同解説の全周期帯で様な補正項を乗じることで推定される20%減衰の速度応答スペクトルから計算されるSI値よりも推定精度が高いことがわかる。道路橋示方書の補正係数を用いた場合の推定SI値は、本研究での距離減衰式を用いる場合と推定精度に大差は見られない結果となった。これは、図-7に示したように、推定された20%減衰の速度応答スペクトルが一部の周期帯では過大な値を、一部の周期帯では過小な値を示すことから、式(7)のように積分して平均化すると、結果として良好なSI値が得られたものと思われる。図-7より、SI値という速度応答スペクトルを平均化した地震動指標値ではなく20%減衰の速度応答スペクトルを推定するときには、従来までの全周期帯で様な補正係数に乗じることはあまり望ましくなく、マグニチュードや周期の影響を考慮し、応答スペクトルの倍率を決定する必要があると考えられる。

以上のように、何らかの原因で強震記録が得られなかった地点や地震計が設置されていない地点で余震観測などを行った場合、余震記録などより5%減衰の応答スペクトルが推定できれば、本研究の距離減衰式を用いて他の減衰比の応答スペクトルに換算可能であると考えられるが、その推定精度に関しては、今後詳細な検討を進める必要がある。

4. 結論

本研究では、5%減衰の応答スペクトルに対する様々な減衰定数の応答スペクトルの比の振幅形状にマグニチュード、断層最短距離、地盤条件などが与える影響を、距離減衰式を用いて検討を行った。さらに、実地震記録を用いて距離減衰式から得られる応答スペクトル比の推定精度を比較した。

気象庁87型地震計で観測された地震記録をもとに1%、2%、5%、10%および20%減衰の応答スペクトルの距離減衰式を作成し、応答スペクトル比の振幅形状について検討を行った結果、マグニチュードの大小で、5%減衰の応答スペクトルに対する1%、20%減衰の応答スペクトル比の振幅形状が変化することがわかった。実地震記録を用いて、距離減衰式から得られる応答スペクトル比の推定精度について検討した結果、一部の応答スペクトル比を除いて概ね良好な推定結果が得られることを確認した。また、本研究で構築した距離減衰式を直接用いて、特殊な用途で必要となる低減衰定数(1%、2%)、高減衰定数(10%、20%)の応答スペクトルを予測することも可能である。

建築物荷重指針・同解説、道路橋示方書・同解説が規定する全周期帯に様な補正係数を乗じて5%減衰の応答スペクトルを任意の減衰定数の応答スペクトルに換算する方法は、2%、10%減衰の応答スペクトルには有効であったが、SI値を算出するときには用いる20%減衰の応答スペクトルに換算するときには精度が低下することが確認された。SI値そのものの推定精度は、距離減衰式を用いた場合と道路橋示方書・同解説で規定されている補正項を用いた場合で、大きな差は見られなかった。

付録 距離減衰式の回帰係数

本研究で構築した応答スペクトルの距離減衰式の回帰係数は、Excelファイルとして<http://ares.tu.chiba-u.jp/~maruyama/Attenuation/index.htm>よりダウンロード可能である。

参考文献

- 1) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，2002.
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004.
- 3) 川島一彦，相沢興，高橋和之：地震応答スペクトルに及ぼす減衰定数の影響，土木学会論文報告集，Vol. 335, pp. 25-29, 1983.
- 4) 丸山喜久，山崎文雄，本村均，浜田達也：常時微動のH/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案，土木学会論文集, No. 675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 5) 村岡七重，丸山喜久，山崎文雄：余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定，日本建築学会構造系論文集，No. 603, 2006 (印刷中)。
- 6) 清水善久，石田栄介，磯山龍二，山崎文雄，小金丸健一，中山渉：都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用，土木学会論文集，No. 738/I-64, pp.283-296, 2003.
- 7) ガス地震対策検討会：ガス地震対策検討会報告書，1996.
- 8) 鈴木博人，島村誠：地震時運転規制方法の研究，JR East Technical Review, No. 3, pp.53-60, 2003.
- 9) Shabestari, K.T. and Yamazaki, F.: Attenuation Relationship of JMA Seismic Intensity using Recent JMA Records, *Proceedings of the 10th Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 1, pp. 529-534, 1998.
- 10) 長尾毅，山田雅行，野津厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No. 801/I-73, pp. 141-158, 2005.
- 11) 気象庁：<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/fig/newm1.pdf>
- 12) Joyner, W. and Boore, D.M.: Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Vellay California earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, pp. 2011-2038, 1981.
- 13) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion indices in Japan including deep focus event, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, pp. 1343-1358, 1995.
- 14) Douglas, J. and Smit, P.M.: How accurate can strong ground motion attenuation relations be?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 91, pp. 1971-1923, 2001.
- 15) Youngs, R.R., Abrahamson, N., Mkdisi, F. I. and Sadigh, K.: Magnitude dependence variance of peak ground acceleration, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, pp. 1161-1176, 1995.
- 16) Yamazaki, F. and Ansary, M.A.: Horizontal-to-Vertical Spectrum Ratio of Earthquake Ground Motion for Site Characterization, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, No. 7, pp. 671- 689, 1997.
- 17) 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁 87 型強震計を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164, 1997.
- 18) 翠川三郎，大竹雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析，日本地震工学会論文集，Vol. 3, No. 1, pp. 59-70, 2003.
- 19) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編，2002.
- 20) 川島一彦，相沢興：減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法，土木学会論文集，No. 344/I-1, pp. 351-355, 1984.
- 21) 壇一男，渡辺基史，佐藤俊明，石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，No. 545, pp. 51-62, 2001.
- 22) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/WNEW/KOOHOU/2004/443/443-5.htm>
- 23) Furumura, T. and Kennett, L.N.: Variations in regional phase propagation in the area around Japan, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 91, No. 4, pp. 667-682, 2001.

(2005. 7. 27 受付)

EFFECT OF DAMPING RATIO ON THE ATTENUATION RELATIONSHIP OF RESPONSE SPECTRUM

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

In this study, attenuation relationships of response spectra with 1%, 2%, 5%, 10% and 20% damping were constructed by using 3990 ground motions recorded by the JMA-87-type accelerometers. Based on the relationships, the amplitude ratios of response spectra with respect to the response spectrum with 5% damping were obtained to reveal the effects of damping ratio and JMA Magnitude on the shape of the amplitude ratio. Then, the verification of predicted response spectrum ratios obtained by attenuation relationships was discussed by using actual earthquake records.